# การศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะไดนามิก โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

# Study of the Effect from Noise Signal to X-Ray Tube Control System in Dynamic Operation Using MATLAB/Simulink

**ชัยพร อัดโดดดร**
อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยการจัดการและเทคโนโลยีเอเชีย
อุบลราชธานี 34000
E-mail: chaiporn__addoddorn@yahoo.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะไดนามิกที่คาบเวลาต่างกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink มาเป็นเครื่องมือที่สำคัญหลักในการวิเคราะห์ เพื่อสร้างรูปแบบจำลองมาตรฐานของระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในคอมพิวเตอร์ขึ้นมา โดยจะอาศัยรูปแบบการจำลองการทำงานของระบบทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย อันได้แก่ Laplace Transform ที่แรงดันอินพุทที่หลอด 100 kV กระแส 400 mA ซึ่งจากการทดสอบระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะดังกล่าว ปรากฏว่า ในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 1 มิลลิวินาที กระแสเอาท์พุทจะมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง -0.64% ถึง -0.98% ในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 10 มิลลิวินาที กระแสเอาท์พุทจะมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง -0.13% ถึง -0.96% และในระบบ

ควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 100 มิลลิวินาที กระแสเอาท์พุทจะมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.13% ถึง 0.36% ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** สัญญาณรบกวน ระบบควบคุม หลอดรังสีเอกซ์ MATLAB/Simulink Laplace Transform

## Abstract

This paper presents a study of the effect of the noise signal to X-ray tube control system in a dynamic operation at different period values of noise signal by using the MATLAB/Simulink program for construction of a standard model control system of X-ray tube on a computer. This control system, using a mathematical model of Laplace Transform in the analysis and design control system at 100 kV input voltage and 400 mA. input current. The simulation confirms that the output current has to be rather constant with between -0.64% to -0.98% error at periods of 1 ms. Furthermore, it confirms that the output current has to be an agreed percent error between -0.13% to -0.96% a period of 10 ms, and confirms that the output current has to be an agreed percent error between 0.13% to 0.36% at periods 100 ms respectively.

**Keywords:** Noise Signal, Control System, X-Ray tube, MATLAB/Simulink, Laplace Transform

## บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาใช้ช่วยในการวิเคราะห์ ออกแบบ จำลองการทำงานในทุกสาขา โดยเฉพาะงานทางด้านไฟฟ้าได้มีการนำเอาซอฟต์แวร์มาใช้ในการออกแบบและจำลองการทำงานกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อผู้ปฏิบัติงานทางด้านไฟฟ้าอย่างมาก เพราะจะช่วยประหยัดเวลาในการออกแบบ หรือทดสอบวงจรภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งค่าที่ได้จะมีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง หรือเป็นตัวอ้างอิงกับผลการทดลองในกรณีที่การทดลองจริงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ ทำให้สามารถวิเคราะห์แก้ไข หาความคลาดเคลื่อนได้ง่ายขึ้น และเนื่องจากปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้ในระบบควบคุมต่างๆ มากขึ้น ทำให้คนที่ทำงานเกี่ยวกับเทคโนโลยีทางด้านนี้จำเป็นต้องเข้าไปสัมผัสกับอุปกรณ์และเครื่องมือสมัยใหม่ต่างๆ เหล่านี้เป็นจำนวนมาก ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้จะมีส่วนของคอมพิวเตอร์เข้าไปเกี่ยวข้องด้วย ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์วัดพารามิเตอร์การทำงานของระบบไปจนกระทั่งถึงระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งอาจจะเป็นทางตรงหรือทางอ้อมก็ตาม ในขณะเดียวกันโลกของดิจิทัลก็ได้เข้ามามีบทบาทและปรับเปลี่ยนรูปแบบของเครื่องมือทางวิศวกรรมให้แตกต่างออกไปจากเดิมเป็นอย่างมาก เพราะฉะนั้นจึงทำให้ทุกคนที่มีส่วน

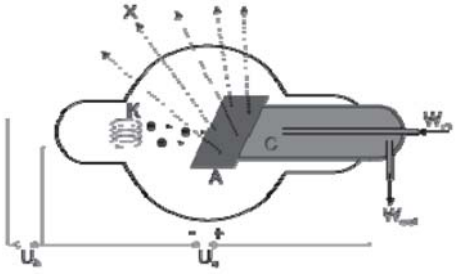
เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมต่างๆ ไม่อาจหลีกเลี่ยงจากอุปกรณ์สมัยใหม่เหล่านี้ได้ และหลอดรังสีเอกซ์ก็เป็นอุปกรณ์สมัยใหม่อีกตัวอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมและวงการทางการแพทย์ที่คนต้องเข้าไปสัมผัสด้วย ซึ่งหลอดรังสีเอกซ์นี้จะเป็นโหลดแบบไม่เชิงเส้น โดยคุณลักษณะการทำงานของหลอดไม่แน่นอน อุณหภูมิและสิ่งรบกวนจากภายนอกจะเป็นตัวเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหลอดตลอดเวลา ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วงหลายมิลลิโอห์มถึงหลายร้อยโอห์ม ทำให้แรงดันที่จ่ายให้กับหลอดรังสีเอกซ์ไม่คงที่ด้วย ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของหลอดต่ำลง ดังนั้น เพื่อที่จะรักษาแรงดันที่หลอดและกระแสที่หลอดให้คงที่ เราจะต้องควบคุมสมรรถนะของแหล่งจ่ายให้คงที่ด้วย ซึ่งในการออกแบบสร้างวงจรจริงจะต้องใช้เวลานานมาก ไม่ประหยัด และการคำนวณมือจะทำให้ยุ่งยากขึ้นไปอีก ดังนั้น จึงได้มีการนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุม รวมไปถึงการจำลองการทำงานของระบบ โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink (มนัส สังวรศิลป์ และคณะ, 2543) มาเป็นเครื่องมือที่สำคัญหลักในการวิเคราะห์ เพื่อสร้างรูปแบบจำลองมาตรฐานของระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในคอมพิวเตอร์ขึ้นมา โดยจะอาศัยรูปแบบการจำลองการทำงานของระบบทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย อันได้แก่ Laplace Transform ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญในการนำมาออกแบบระบบควบคุมการทำงานหลอดรังสีเอกซ์ เพื่อทำให้การออกแบบระบบควบคุมง่ายขึ้น และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเลือกนำมาสร้างระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์เพื่อรักษาแรงดันและกระแสที่หลอดให้คงที่ในสภาวะต่างๆ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายที่หลอด อุณหภูมิภายในหลอด และสิ่งรบกวนจากภายนอก อันได้แก่ สิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบและสิ่งรบกวนที่เซ็นเซอร์ เป็นต้น

## ทฤษฎีและหลักการ

### 1. หลักการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์ คือ หลอดสุญญากาศที่ถูกออกแบบมาเพื่อผลิตรังสีโปรตอนเอกซเรย์ ซึ่งรังสีเอกซเรย์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยภายในหลอดรังสีเอกซ์นี้จะประกอบด้วยแคโธดซึ่งทำหน้าที่กระจายอิเล็กตรอนภายในหลอด และแอโนดจะรวบรวมอิเล็กตรอน ซึ่งก็คือ การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านหลอดนั่นเอง โดยมีแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ต่อระหว่างแคโธดและแอโนดประมาณ 30 ถึง 150 kV ($U_q$) และแรงดันไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแสด้วยเวลาประมาณ 0.001 ถึง 1 วินาที และกระแสจะไหลอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1000 mA โดยจุดรวมอิเล็กตรอนบนทังสเตนแอโนดที่วิ่งมาจากแคโธดจะชนกันกับอิเล็กตรอนอื่น ซึ่งก็คือ ไอออนและนิวคลีภายในแอโนด และประมาณ 1% พลังงานจะผลิตการแผ่รังสีตั้งฉากกับเส้นทางกระแสอิเล็กตรอน ซึ่งก็คือ รังสีโปรตอนเอกซเรย์ นอกจากนั้น ทังสเตนจะสะสมอิเล็กตรอนไว้บนพื้นที่ผิวแก้วของหลอด ซึ่งจะลดการแตกตัวอย่างช้าๆ ของแกนรังสีเอกซ์ ในที่สุดทังสเตนจะสะสมไว้กลายเป็นปฏิกิริยาที่เพียงพอในการอาร์ค ซึ่งการอาร์คนี้จะกระโดดจากแคโธดไปยังทังสเตนและต่อไปยังแอโนด ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งภายในกระเปาะแก้วจะมีความดันของอากาศประมาณ 100 Pa โดยประกอบด้วยอะลูมิเนียมแคโธด ซึ่งมีรูปร่างโค้งเพื่อรวมอิเล็กตรอนให้ไหลไปยังแอโนด (A) หรือ target

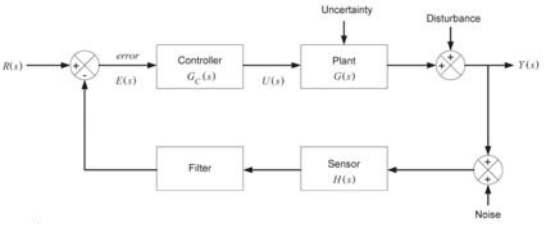
นั่นเอง เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งไปถึงแอโนดความเร็วก็จะลดลงทำให้เกิดรังสีเอกซ์ (X) ขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกสร้างโดยความร้อนจากทังสเตนไฟลาเมนต์ โดยกระแสไฟฟ้าไฟลาเมนต์ จากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ $U_b$ ซึ่งไฟลาเมนต์ก็คือแคโธด (K) ของหลอดนั่นเอง และเนื่องจากแอโนดทั้งหมดถูกบรรจุอยู่ภายในหลอด การระบายความร้อน (Cooling) จะเป็นปัญหาสำคัญในการนำความร้อนออกจากแอโนดด้วย ซึ่งแอโนดต้องสร้างมาจากวัสดุที่ทนอุณหภูมิสูงถึง *2500 °C* โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ คือ ทังสเตน – ฮีเนียม บนแกนเงินผสมเหล็ก และระบายความร้อนด้วยน้ำ (Watering) อีกทีหนึ่ง




**ภาพที่ 1** ลักษณะการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์

**2. ระบบควบคุม**

ระบบควบคุมในที่นี้ บางครั้งจะเรียกว่าระบบควบคุมอัตโนมัติ หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ หรือระบบควบคุมแบบปิด (วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ, 2548) ก็ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยสัญญาณคำสั่งอ้างอิง R(s) ที่มีลักษณะเดียวกับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ H(s) จะทำการเปรียบเทียบกันแล้วจะได้สัญญาณผิดพลาด E(s) ซึ่งสัญญาณผิดพลาดนี้จะถูกส่งเข้าไปยังตัวควบคุม $G_C(s)$ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุม U(s) และสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมนี้จะใช้เป็นสัญญาณควบคุมที่จะส่งเข้าไปยังระบบที่ต้องการควบคุม G(s) ซึ่งจะส่งสัญญาณเอาท์พุท Y(s) ออกมาแล้วส่งกลับมายังอุปกรณ์ตรวจรู้อีกทีหนึ่ง




**ภาพที่ 2** แผนภาพบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบปิด

## วิธีดำเนินการวิจัย

ทำการสร้างระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์โดยการนำเอา block diagram แต่ละบล็อก ในหน้าต่าง library simulink (The Mathworks, 2002) ในโปรแกรม MATLAB มาต่อกันตามต้องการ แล้วทำการป้อนสัญญาณอินพุทให้กับระบบโดยในสภาวะไดนามิกจะป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลาให้กับระบบ และในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนจะทำการเพิ่มสัญญาณพัลส์เข้าไปในลูปป้อนกลับ ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

**1. การสร้างรูปแบบจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ ในสภาวะไดนามิก** โดยมีเงื่อนไข ดังนี้

**Tube current reference:** เป็นค่าที่ต้องการของกระแสอ้างอิงที่หลอด โดยใช้ constant value block เป็นตัวกำหนด ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.4 mA

**Multiplying factor 1:** เป็นกล่องที่เปลี่ยนกระแสอ้างอิงที่หลอดจากมิลลิแอมป์ให้เป็นแอมป์ ซึ่งเป็นหน่วยมาตรฐาน โดยใช้ constant value block เป็นตัวกำหนด ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ

1000 เมื่อผ่านกล่อง Product จะทำให้กระแสอ้างอิงที่หลอดเปลี่ยนเป็น 400 mA หรือ 0.4 A

**Filament preheats:** เป็นกล่อง look up table โดยกำหนดกระแสไส้หลอดที่ค่าต่างๆ ให้ตรงกับกระแสอ้างอิงที่หลอด (Rajwade, 2001) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่หลอด

**Multiplying factor 2:** เป็นค่าเอาท์พุทของตาราง Preheat โดยใช้ constant value block เป็นตัวกำหนด ซึ่งในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.0005

**Multiplying factor 5:** เป็นค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไส้หลอดที่หลอด ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ 5 mA

**Filament preheats 1:** เป็นตารางที่คล้ายกับตาราง Preheat ก่อนหน้านี้ แต่จะเลือกอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสไส้หลอดที่หลอดมาพิจารณาด้วยทำให้อินพุทของ look up table เป็น tube current reference – 5 mA แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่หลอด

**Multiplying factor 6:** เป็นค่าของ loop gain เพื่อที่จะทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ tube current reference

**Filament power supply:** เป็นแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับหลอดรังสีเอกซ์ ซึ่งนำไปขับไส้หลอดเพื่อสร้างกระแสไส้หลอดที่ต้องการ โดยทรานสเฟอร์ฟังก์ชันจะคล้ายกับฟิลเตอร์ที่มีแบนวิดธ์ประมาณ 1 kHz และอัตราขยายเท่ากับ 1 ซึ่งอยู่ในรูปของ Laplace Transform หรือ s โดเมน

**Filament feedback:** เป็นค่า time constant ของวงจรป้อนกลับของ Filament power supply ซึ่งอยู่ในรูปของ Laplace Transform หรือ s โดเมน

**Nyquist filter:** เป็นฟิลเตอร์เพื่อลดสัญญาณรบกวนและสัญญาณระลอกจากสัญญาณการป้อนกลับของ Filament power supply ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 และค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 1 S ซึ่งอยู่ในรูปของ Laplace Transform หรือ s โดเมน

**Filament current filter:** เป็นฟิลเตอร์เพื่อลดสัญญาณรบกวนและสัญญาณระลอกจากสัญญาณการป้อนกลับเช่นเดียวกันกับ Nyquist filter ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 0.001 และค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 1 mS ซึ่งอยู่ในรูปของ Laplace Transform หรือ s โดเมน

**Multiplying factor 3:** เป็นส่วนกลับของค่าที่ต้องการของเอาท์พุท ซึ่งเมื่อนำไปผ่านบล็อก Product ก็จะกลายเป็นค่าผิดพลาดของระบบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ **(desired output – actual output)/ desired output** นั่นเอง

**Multiplying factor 4:** เป็นค่าที่เปลี่ยนค่าผิดพลาดให้กลายเป็นค่าเปอร์เซ็นต์

**Dose variation:** เป็นบล็อกรูปคลื่นไซน์ที่เพิ่มเข้าไปกับกระแสหลอดอ้างอิง ซึ่งตั้งค่าสูงสุดไว้ที่ 0.1 mA ที่ความถี่ 5000 Hz

**บล็อกไดอะแกรมย่อยของหลอดรังสีเอกซ์ (Sub-Block X-Ray tube)**

**Low pass filter:** เนื่องจากกระแสไส้หลอดจะเปลี่ยนไปด้วยจำนวนที่แน่นอนและการเปลี่ยนจะเป็นไปโดยการกระจายแบบความร้อนที่มีเวลาหน่วง เราจึงเพิ่ม low pass filter เข้าไปด้วยความถี่คัทออฟ 100 kHz ซึ่งอยู่ในรูปของ Laplace Transform หรือ s โดเมน

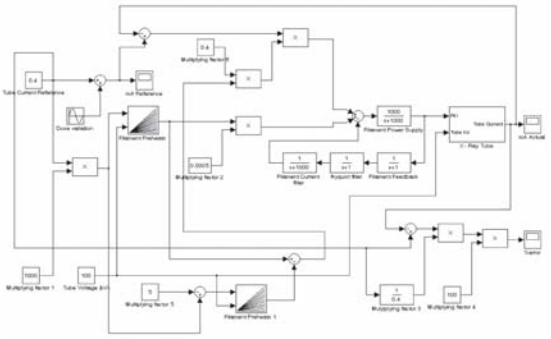
**Tube current mapping:** หลอดเป็นรูปแบบการจำลองการทำงานที่สำคัญ ซึ่งเราจะใช้ look up table ที่ประกอบไปด้วยคุณลักษณะสมบัติของข้อมูลที่แท้จริงของค่ากระแสหลอด (Rajwade, 2001) เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่หลอด

**Saturation block:** เราจะใช้ saturation limit block ในการกำหนดค่าสูงสุดของกระแสหลอดที่ 500 mA และกระแสต่ำสุดที่ 0 mA เพื่อให้กระแสไหลทิศทางเดียวเท่านั้น

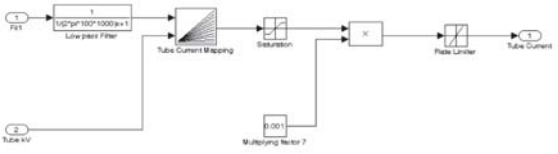
**Multiplying factor 7:** เปลี่ยนกระแสเอาท์พุทของ look up table ให้กลายเป็น mA เช่นเดียวกันกับ Tube current reference

**Rate limiter:** เป็นการตั้งค่าอัตราการไต่ขึ้นไว้ที่ 3.5 และอัตราการไต่ลงที่ -4.5 ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสหลอด

ซึ่งเมื่อนำระบบทั้งหมดมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมจะได้ดังภาพที่ 3 และ 4



**ภาพที่ 3** บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะไดนามิก



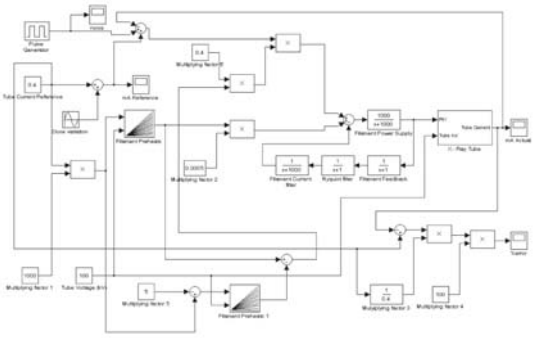
**ภาพที่ 4** บล็อกไดอะแกรมย่อยของหลอดรังสีเอกซ์

**2. การสร้างรูปแบบจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ ในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน**โดยมีเงื่อนไข ดังนี้

รูปแบบการจำลองระบบควบคุมการทำงานในสภาวะนี้จะคล้ายกับรูปแบบแรก เพียงแต่เพิ่มบล็อกสัญญาณพัลส์เข้าไปในลูปป้อนกลับ ซึ่งเป็นบล็อกที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเท่านั้นโดยมีเงื่อนไข ดังนี้

**Pulse Generator:** เป็นบล็อกสัญญาณพัลส์ที่เพิ่มเข้าไปในลูปป้อนกลับเพื่อใช้แทนสัญญาณรบกวนในระบบ (Rajwade, 2001) ซึ่งตั้งค่าสูงสุดไว้ที่ 0.1 mA duty ratio 10% คาบเวลา 1, 10 และ 100 มิลลิวินาที ตามลำดับ

ซึ่งเมื่อนำระบบมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมจะได้ดังภาพที่ 5



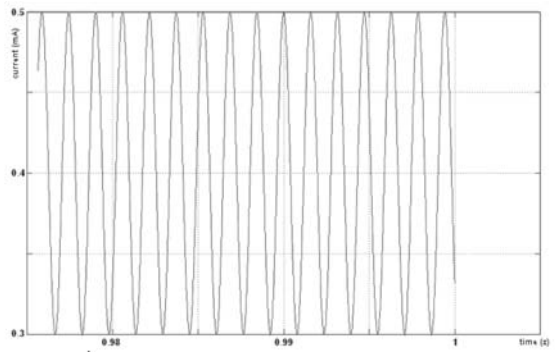
**ภาพที่ 5** บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวนที่ลูปป้อนกลับ

## ผลการวิจัย

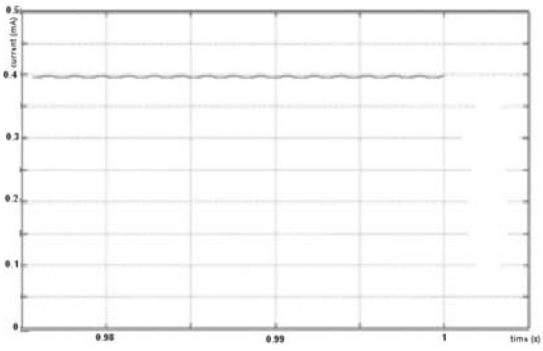
ทำการทดสอบรูปแบบจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะไดนามิก โดยใช้สัญญาณอินพุทเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา และในสภาวะที่มีสัญญาณ

รบกวนโดยป้อนสัญญาณพัลส์เพิ่มเข้าไปที่ลูปป้อนกลับที่คาบเวลา 1, 10, 100 มิลลิวินาที ตามลำดับ แล้วดูผลลัพธ์ที่ได้ของระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ที่ออกแบบไว้ ซึ่งได้แก่ กระแสหลอดเอาท์พุทที่แท้จริง และค่าผิดพลาดของกระแสหลอดที่ได้ เปรียบเทียบกับเวลา 1 วินาที ดังนี้

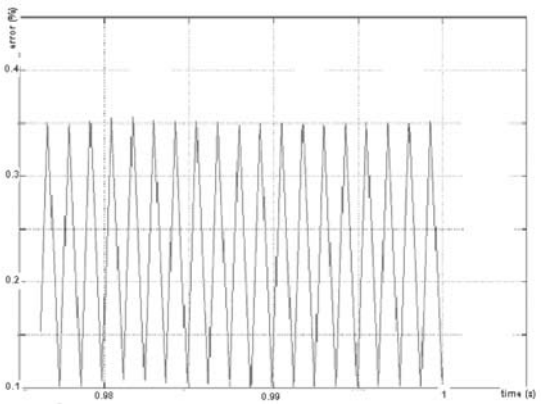
**1. ผลการจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะไดนามิก**



**ภาพที่ 6** กระแสหลอดอ้างอิงในสภาวะไดนามิก (mA)

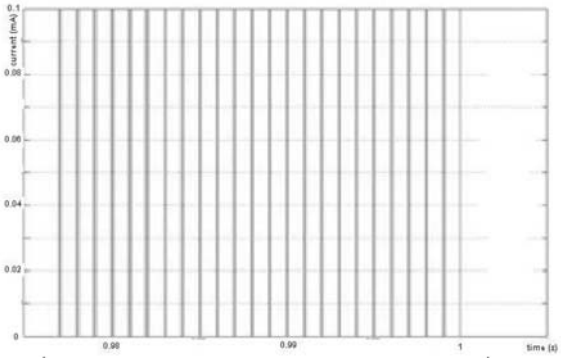


**ภาพที่ 7** กระแสเอาท์พุทที่แท้จริงในสภาวะไดนามิก (mA)

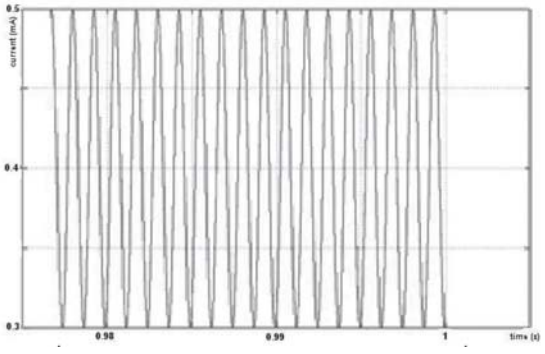


**ภาพที่ 8** ค่าผิดพลาดของกระแสหลอดในสภาวะไดนามิก (%)

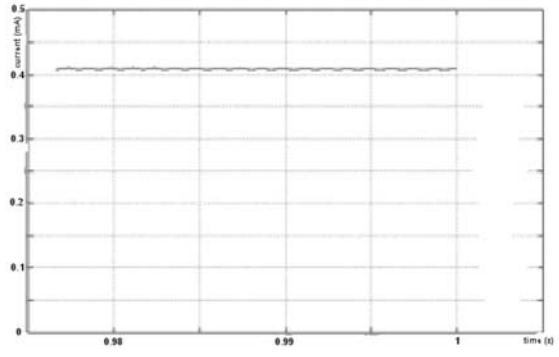
**2. ผลการจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ ที่สัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 1 มิลลิวินาที**



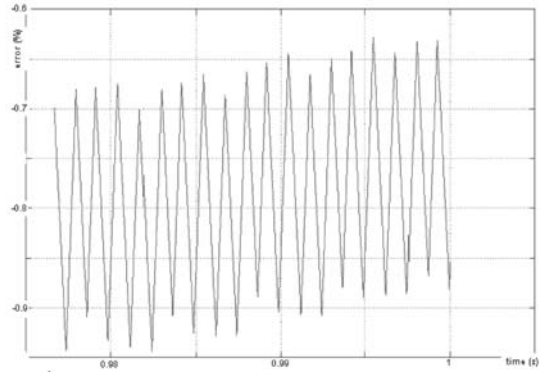
**ภาพที่ 9** กระแสสัญญาณรบกวนในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)



**ภาพที่ 10** กระแสหลอดอ้างอิงในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)

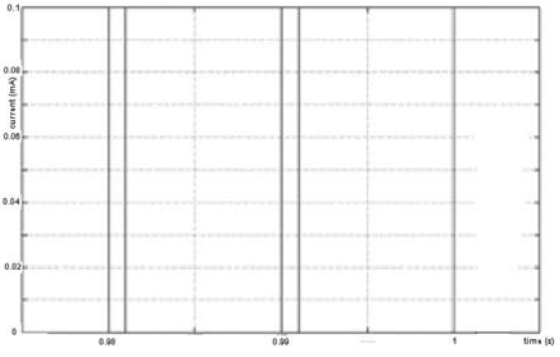



**ภาพที่ 11** กระแสเอาท์พุทที่แท้จริงในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)

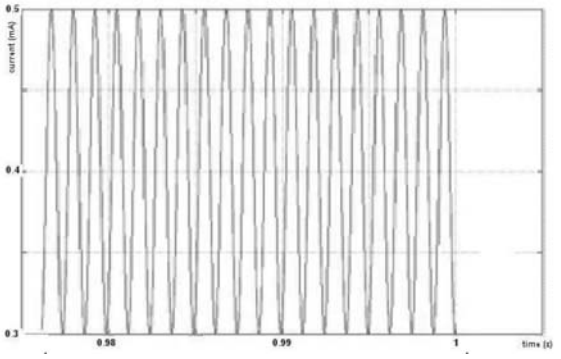



**ภาพที่ 12** ค่าผิดพลาดของกระแสหลอดในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (%)

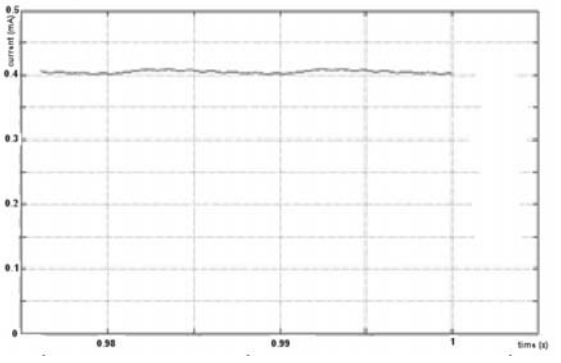
**3. ผลการจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ที่สัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 10 มิลลิวินาที**



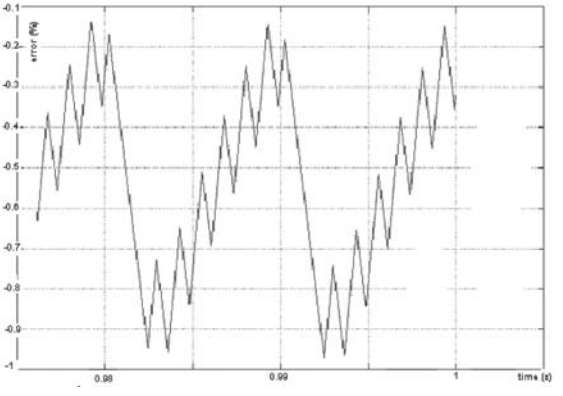

**ภาพที่ 13** กระแสสัญญาณรบกวนในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)




**ภาพที่ 14** กระแสหลอดอ้างอิงในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)

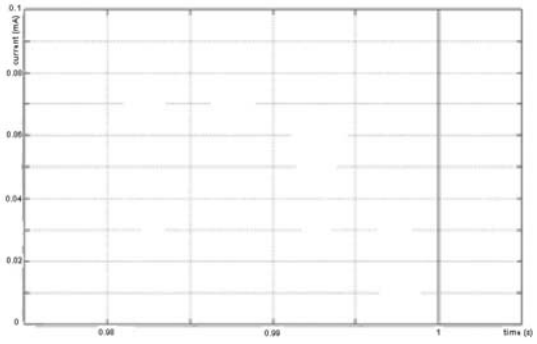



**ภาพที่ 15** กระแสเอาท์พุทที่แท้จริงในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)

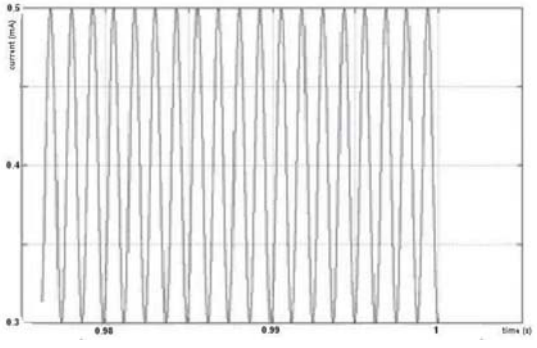



**ภาพที่ 16** ค่าผิดพลาดของกระแสหลอดในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (%)

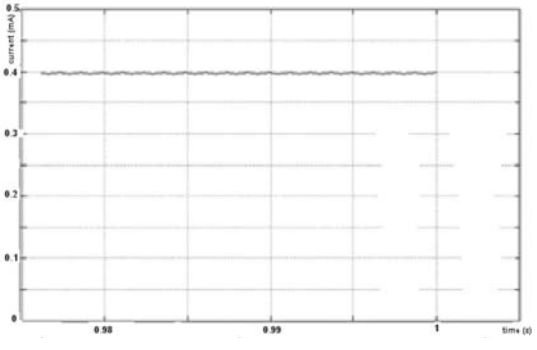
**4. ผลการจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ที่สัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 100 มิลลิวินาที**



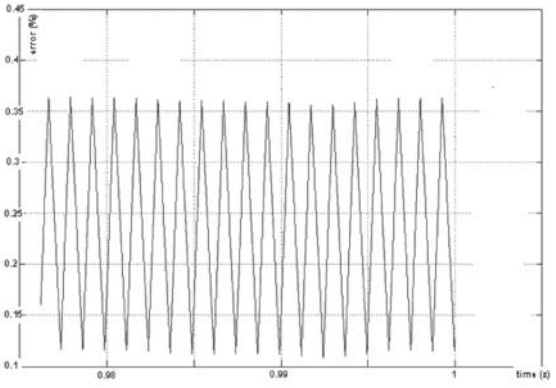
**ภาพที่ 17** กระแสสัญญาณรบกวนในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)



**ภาพที่ 18** กระแสหลอดอ้างอิงในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)



**ภาพที่ 19** กระแสเอาท์พุทที่แท้จริงในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (mA)



**ภาพที่ 20** ค่าผิดพลาดของกระแสหลอดในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวน (%)

## บทสรุป

จากการจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะไดนามิก จะพบว่า เมื่อเราทำการเปลี่ยนค่ากระแสหลอดอ้างอิงจากสัญญาณคงที่ให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่มีขนาดสูงสุด 0.5 mA และขนาดต่ำสุด 0.3 mA ที่ความถี่ 5000 Hz แต่ระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ที่ออกแบบไว้ยังคงสามารถควบคุมกระแสหลอดเอาท์พุทที่แท้จริงให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสหลอดอ้างอิง 0.4 mA ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.10% ถึง 0.35% และจากการจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในสภาวะไดนามิกที่มีสัญญาณรบกวนที่คาบเวลาต่างกัน จะพบว่า ระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ที่ออกแบบไว้ยังคงสามารถควบคุมกระแสหลอดเอาท์พุทที่แท้จริงให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสหลอดอ้างอิง 0.4 mA ได้ โดยในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 1 มิลลิวินาที กระแสเอาท์พุทที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง -0.64% ถึง -0.98% ในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 10

มิลลิวินาทีกระแสเอาท์พุทที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง -0.13% ถึง -0.96% และในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 100 มิลลิวินาที กระแสเอาท์พุทที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.13% ถึง 0.36% กล่าวคือ ในสภาวะไดนามิก กระแสหลอดเอาท์พุทที่แท้จริงจะมีค่าสูงสุด 0.3996 mA และต่ำสุด 0.3986 mA ส่วนในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 1 มิลลิวินาที กระแสหลอดเอาท์พุทที่แท้จริงจะมีค่าต่ำสุด 0.40256 mA และสูงสุด 0.40392 mA ในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 10 มิลลิวินาที กระแสหลอดเอาท์พุทที่แท้จริงจะมีค่าต่ำสุด 0.40052 mA และสูงสุด 0.40384 mA และในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนที่มีคาบเวลา 100 มิลลิวินาที กระแสหลอดเอาท์พุทที่แท้จริงจะมีค่าสูงสุด 0.39948 mA และต่ำสุด 0.39856 mA อันเนื่องมาจากที่ค่าความผิดพลาดเป็นลบกระแสเอาท์พุทที่แท้จริงมีค่ามากกว่ากระแสหลอดอ้างอิง ส่วนที่ค่าความผิดพลาดเป็นบวกกระแสเอาท์พุทที่แท้จริงมีค่าน้อยกว่ากระแสหลอดอ้างอิงนั่นเอง ซึ่งในการใช้งานจริงๆ กระแสหลอดเอาท์พุทที่แท้จริงควรมีค่าไม่เกินกระแสหลอดอ้างอิงที่กำหนดไว้ เพื่อให้หลอดมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า เมื่อสัญญาณรบกวนมีคาบเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้กระแสหลอดที่แท้จริงมีค่าใกล้เคียงกับกระแสหลอดอ้างอิง 0.4 mA มากขึ้นและใกล้เคียงกับกระแสหลอดที่แท้จริงในสภาวะไดนามิกด้วย ทำให้สามารถสร้างเป็นรูปแบบจำลองระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในคอมพิวเตอร์ขึ้นมาได้ ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์และแก้ไขหาความคลาดเคลื่อนได้ง่ายขึ้นต่อไป และสามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเลือกนำมาสร้างระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์เพื่อรักษาแรงดันและกระแสที่หลอดให้คงที่ในสภาวะไดนามิก ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนที่ลูปป้อนกลับได้

## ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาระบบควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในรูปแบบอื่นๆ ด้วยวิธีการต่างๆ อีกนอกจากวิธีการของ Laplace Transform ที่อยู่ในรูปของ s โดเมน อาทิ วิธีการของ State-Space ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์จะเขียนอยู่ในรูปแบบของกลุ่มสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง โดยตัวแปรของสมการนี้ เรียกว่า ตัวแปรสเตท (state) ซึ่งถ้าแก้สมการของกลุ่มสมการเชิงอนุพันธ์นั้นแล้วผลลัพธ์ก็สามารถแสดงอยู่ในปริภูมิ (space) ซึ่งจะเหมาะมากเมื่อระบบมีความยุ่งยากซับซ้อน คือ อันดับสมการเชิงอนุพันธ์มีค่าสูง หรืออาจมีหลายอินพุทและหลายเอาท์พุทก็ได้ และวิธีการของ Z Transform ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญตัวหนึ่งที่จะนำมาแก้ปัญหาในระบบควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นรูปแบบการทำงานของดิจิทัลคอมพิวเตอร์ในโลกปัจจุบันนี้

## เอกสารอ้างอิง

มนัส สังวรศิลป์ และคณะ. 2543. **คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์.** นนทบุรี: อินโฟเพรส.

วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ. 2548. **การควบคุมระบบพลศาสตร์.** กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Rajwade, Jaisingh. 2001. “Emission Control System for an X-RAY Tube”. Master of Science in Electrical Engineering, Cleveland State University.

The Mathworks. 2002. **User'Guide Version 1: Nonlinear control design blockset for use with Simulink.** Natick, MA: Apple Hill Drive.

**Mr. Chaiporn Addoddorn** received his Bachelor's degree from King Mongkut's University of Technology Thonburi in Electrical Engineering, and Master's Degree in Electrical Engineering from Khonkaen University. He is currently working in the Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, the Asian University of Management and Technology (UMT), Ubonratchathani, Thailand.